粒子充てん構造物の減衰特性評価法について*

若澤 靖 記** 橋本 正 俊** 丸井 悦 男***

Evaluation Method of Damping Characteristics of Structures Packed with Balls

Yasunori WAKASAWA, Masatoshi HASHIMOTO and Etsuo MARUI

In this paper, a technique how to evaluate the damping characteristics of structures packed with balls is experimentally discussed by considering a free vibration response to impulsive force. Test structures are square pipes excitedly packed with glass balls, steel balls and sintered alumina balls. In such structures, various damping characteristics appear by changing the ball size. However, it is difficult to evaluate the various damping characteristics of structures packed with balls by means of general evaluation technique, such as half-power method and logarithmic decrement method. Therefore, a general evaluation technique of damping characteristic applicable to a linear or a nonlinear system, and also applicable to a low damping capacity or to a high damping capacity is examined. In this study, it is experimentally confirmed that the evaluation of such damping characteristics is possible by considering the damping time and the damping wave area in free vibration response.

Key words: evaluation method, half-power method, logarithmic decrement, damping capacity, damping energy, damping time, damping wave area, machine structure packed with balls

1. ま え が き

機械構造物の振動減衰特性を改善することは、高精度化・高能率化および機械の寿命延長による省資源化などから重要度が高く、現在までに減衰能改善に関する多くの研究が行なわれている。

減衰特性の改善に関しては、鋼とそれよりも高減衰能のレジンコンクリートや FRP などを複合化^{1) 2)}すること、制振材料を使用³⁾すること、永久磁石や電磁石を用いた磁気ダンパ⁴⁾や ER 流体の特性を利用したダンパ⁵⁾を適用することなどが試みられ、かなりの成果が挙げられている。

一方、固体の衝突を利用したダンパは比較的構造が単純であり、優れた減衰能改善方法である。荒木らによる粉粒体衝撃ダンパ⁶⁾がその一例である。著者らも衝撃ダンパとして角パイプにガラス球を充てんした粒子充てん構造物⁷⁾をインパルス加振した場合の減衰特性をハーフパワー法により測定し、粒径、充てん率および粒子の反発係数などの影響について実験的に検討した。さらに減衰能向上に効果的な粒子充てん構造物を見出すため、充てん粒子の材質を変更して減衰波形を観察したところ、非常に減衰能が高く、数周期で振動が消滅する場合や減衰波形が不規則となる場合などがあり、ハーフパワー法によっては減衰能を正しく評価しえない場合も数多くみられた。そこで本報では、幅広い振動減衰波形を示す粒子充てん構造物の減衰能を的確かつ簡便に評価することができる手段と減衰能に関する新しい特性値を提案することを目的として、詳細な検討を行った。

2. 実験方法

図 1 は、実験装置の概略を示したもので、基本的には前報⁷⁾と同様である。モデル構造物として、一辺 $w = 25.1$ mm, 厚さ $t = 1.5$

mm (空洞部一辺 $b = 22.1$ mm), 長さ $L = 500$ mm のステンレス鋼 (SUS304) 製の角パイプを使用した。充てん粒子の材質を種々に変えて、粒径 d の影響を調べた。モデル構造物空洞部にすきまなく粒子を充てんすることができるよう、角パイプを加振しながら充てんを行った。なお、モデル構造物の両端面は、厚さ 5 mm のメタクリル樹脂板により密閉した。

モデル構造物をステンレス鋼製のワイヤにより基準振動一次モードの節の位置でつり、中央部をインパルスハンマにより打撃加振した。加振力およびモデル構造物の端部から 10 mm の位置に取り付けた小型軽量の加速度計からの出力信号をチャージアンプ、バンドパスフィルタを介して FFT アナライザに転送し、加振力および加速度の経時変化、周波数応答などを求めた。

表 1 は実験条件を示したものである。充てん粒子には、寸法精度の高い玉軸受用鋼球、ガラス球および焼成アルミナ球（以下、単にアルミナ球と記述する）を用いた。粒子材質によってわずかに真球度が異なっているものの、最稠密充てん時の充てん形態は空洞部長手方向にほぼ均一となっており、規則正しい粒子の配列がみられた。しかし、粒子の充てん形態は、粒径により大きく異なる。なお、加振実験におけるインパルス加振力 F は、加振しやすいことなどを考慮して 150 N とした。

3. ハーフパワー法による減衰特性の評価

既報⁷⁾で、ガラス球を充てんした構造物では、インパルス応答をハーフパワー法で解析することにより減衰特性を的確に評価しうることを示した。ここでは、さらに鋼球を充てんした構造物のインパルス応答とその周波数分析結果を図 2 に示す。図 (a) は $d = 8$ mm の場合で、振動はきわめて短時間で消滅している。周波数応答は、非常に小さくなりピークが明確ではなくなる。図

(b) は $d = 22$ mm の場合で、減衰振動波形にはいくつかの周波数成分の振動が重なり合っており、不規則な変動を繰り返している。周波数応答の結果には、近接した多数の周波数成分が存在することになる。ここで示した 2 例については、周波数応答のピークが非常に小さくなることや多数の周波数成分の存在など

* 原稿受付 平成 13 年 1 月 24 日

** 正 会 員 豊田工業高等専門学校 (豊田市栄生町 2-1)

*** 正 会 員 岐阜大学工学部 (岐阜市柳戸 1-1)

の理由によりハーフパワー法の適用は避けるべきであることがわかる。また、図 (b) 中に破線で示したように、減衰波形において減衰傾向は途中で変化しており、加振直後の減衰能が大きい部分が終了する時刻を T_d と表示した。

次に、各種の粒子を充てんしたモデル構造物においてインパルス加振実験により得られた一次モードと考えられる周波数応答に対してハーフパワー法を適用し、減衰比 ζ を粒径 d に対して求めたものが図 3 である。なお、前述 (図 2) の理由により、

Fig. 1 Experimental apparatus

Table 1 Experimental conditions

Square pipe (SUS304)	Size (inner)	25.1×25.1 (22.1×22.1) mm
	Thickness	$t = 1.5$ mm
	Length	$L = 500$ mm
Packed material and size	Steel ball, Glass ball, Sintered alumina ball	
	Diameter	$d = 1\text{--}22$ mm
Impulsive force		$F = 150$ N

(a) High damping capacity (Steel ball, $d=8$ mm)

(b) Low damping capacity (Random vibration wave) (Steel ball, $d=22$ mm)

Fig. 2 Free vibration and frequency response

求められた減衰比が、減衰能を正しく評価していないと思われる場合に対してプロット点内部に×印を付けた。ガラス球充てん時に比べて他の材質の粒子を充てんした場合には、ハーフパワー法による減衰比 ζ の評価が疑問視される場合がかなり多くなっている。また、鋼球あるいはアルミナ球を充てんすると、ガラス球充てん時に比べて減衰比が大きくなるようである。しかし、一般的に減衰が大きい場合にはハーフパワー法の適用は避けなければならない⁸⁾ことが指摘されており、広範な減衰特性を統一して評価しうる方法を確立する必要がある。

4. 各種減衰特性評価法と時間領域法による減衰特性

粒子充てん構造物の振動波形の中にハーフパワー法による減衰特性の評価が適切でない場合がみられたことから、粒子充てん構造物へ普遍的に適用可能な減衰特性の評価法を追求することとした。

4.1 減衰特性評価法

減衰特性を求めるために古くからいろいろな研究が行われてきた。表 2 に振動系の減衰能を求める方法および減衰能の特性値を示す。周波数領域法に属する方法には、周波数応答曲線の共振振動数近傍の形状から減衰特性を求めるハーフパワー法、定常応答曲線の計算結果が実験結果にフィットするように減衰特性値を設定する曲線適合法などがある⁹⁾。王らにより提案されたすそ影響法¹⁰⁾は曲線適合法に属する方法で、多自由度系にも適用可能な方法である。

時間領域法には、衝撃応答の時刻歴の相隣る振幅の比の対数から減衰能を求める対数減衰法、鈴木らが提案した不規則振動時系列から減衰比を推定する AR 法¹¹⁾などがある。また、接合

Fig. 3 Effect of ball size on damping ratio (Half-power method)

Table 2 Evaluation method and characterization factor for damping capacity

Excitation method	Evaluation method of damping capacity	Characterization factor
Impulsive excitation	[Frequency domain method]	● Frequency response (Compliance etc.) ● Damping ratio ● Loss factor ● Logarithmic decrement ● Equivalent damping coefficient
	● Half-power method ● Curve fitting method - Minimization of sum of square of error - Comparison at least points - Evaluation of lobe effect - Multi degrees of freedom method etc.	
Steady excitation		
Random excitation	[Time domain method]	● Damping slope, Remaining amplitude ● Damping time
	● Logarithmic decrement method ● AR method · ARMA method ● Statistical analysis method	

面により生じる複雑な減衰力を検討するために摩擦力が作用する系の減衰振動の解析¹²⁾や機械構造物が示す動的挙動の非線形特性の推定法に関する研究¹³⁾も行われている。しかしながら、線形振動系、非線形振動系にかかわらず、高減衰から低減衰の減衰特性を統一的に、しかも簡便に求めることができる方法についてはまだ明らかにされていない。

一方、減衰能を表す特性値として一般的に用いられるものには、減衰比、損失係数、対数減衰率および共振周波数における周波数応答の値（例えばコンプライアンス）など数多くのものがある。これらの減衰比や対数減衰率は、振動系の質量項、剛性項、減衰項のすべての効果が含まれる特性値であり、多くの振動系に対して減衰特性を評価可能にする特性値である。この他に粉粒体衝撃ダンパに限定しても、各種の特性値が提案されている。荒木らによる粉粒体衝撃ダンパの研究⁶⁾では減衰波形を指数曲線により近似することにより求められる等価減衰係数、PanossianによるNOPD技術の研究¹⁴⁾では、周波数応答から求められる各モードの周波数応答の値、減衰比、減衰効果を総合的に説明するために振動減少率（中空時の振幅/充てん時の振幅）を定義している。田辺らによるパウダコンポジットダンパの研究¹⁵⁾では、コンプライアンスおよび一次モードの対数減衰率により減衰能を評価している。安田らによる衝撃ダンパの研究¹⁶⁾、斎藤らによる柱体用衝撃ダンパの研究¹⁷⁾では減衰こう配あるいは減衰速度（単位時間当たりの振幅の減少量）および残留振幅（衝撃ダンパでは抑制し得ないで、後に残る振幅値）により減衰能を評価している。制振材料やゴムなど粘弾性体を利用したダンパでは、損失係数により評価されることが多い¹⁸⁾。山口らによるばね剛性制御による準能動形制振装置の研究¹⁹⁾では、振動系のエネルギーを考慮した減衰時間なる特性値を提案している。

4.2 時間領域法による減衰特性

第3章で示したように、粒子充てん構造物の減衰特性をハーフパワー法により普遍的に評価することは困難であった。ハーフパワー法は周波数応答に基礎をおく方法であるので、同じ基礎をもつ周波数領域法に属する他の方法によっても粒子充てん構造物の減衰特性を的確に評価することは困難である。そこで、時間領域法により粒子充てん構造物の減衰特性を検討することにした。

はじめに、時間領域法に属する代表的な評価法である対数減衰法により減衰特性を評価した。ハーフパワー法による評価ができなかった2例（図2）について、対数減衰法による評価を適用した一例を図4に示す。図は鋼球 $d=8$ mm, $d=22$ mm の加速度波形の経時変化から連続する振幅間の関係である $a_n - a_{n+1}$ 線図を求めたものである。対数減衰法では、この $a_n - a_{n+1}$ 線図の傾きか

Fig. 4 $a_n - a_{n+1}$ diagram

ら対数減衰率 δ を求める。

図 (a) は高減衰能の場合で、ハーフパワー法による評価はできなかった。図にみられるように、 $a_n - a_{n+1}$ 関係を直線で近似することができるので、対数減衰法を適用して差し支えない。また図 (b) は、低減衰能で不規則な振幅の経時変化がみられた場合である。 $a_n - a_{n+1}$ 関係は、直線近似することができない不規則な変化をしている。このため、振幅の経時変化が不規則な場合に対数減衰法を適用することは不可能である。

粒子充てん構造においては、多様な $a_n - a_{n+1}$ 関係がみられる。そこで以下のようにして対数減衰率 δ を求めた。規則的な振動が長時間継続する場合には計測時間 (250 ms) 内における自由振動応答すべてから、計測時間内に振動が消滅する場合には振動が判別できる範囲の自由振動応答から平均的な δ を算出した。また、不規則な減衰波形となる場合においても加振直後には周期が一定となっているので、その周期を基準として振幅を判別し、平均的な δ を求めた。図5は、各種モデル構造物に対して求めた対数減衰率 δ に及ぼす粒径 d の影響を示したものである。図3のハーフパワー法により求めた減衰比とは大きく異なった結果となり、特にアルミナ球の小粒径粒子を充てんした場合に対数減衰率が高くなることからわかる。この図においても、対数減衰法を適用できない場合を×印で表示した。ハーフパワー法よりも減衰特性を評価できない場合が減っているが、ガラス球を充てんした場合にも対数減衰法が適用できない場合がある。

次に、時間領域法に属する評価法の2例めとして、インパルス加振直後の最大加速度振幅 a_{max} により減衰特性を評価してみた。図6は各モデル構造物における振幅の最大加速度振幅 a_{max} と充てん粒径 d の関係を示したものである。中空モデル構造物空洞部

Fig. 5 Effect of ball size on logarithmic decrement

Fig. 6 Effect of ball size on maximum acceleration amplitude

の一边の半分以下の粒径の粒子を充てんすると $a_{\max}$ が比較的小さくなる。一方、粒径がこれよりも大きい場合には $a_{\max}$ は大小さまざまな値になる。しかし、振動が消滅するまでの時間など減衰能を評価する他のパラメータを図6から得ることはできない。

さらに、振幅の統計的な取り扱いおよび可能な範囲での減衰速度、残留振幅による減衰特性の評価も試みたが、良好な結果とはならなかった。また、鈴木らによるAR同定法¹¹⁾は、不規則時系列や減衰比の大きい系に対しての適用が有効であるとされていることから、非常に広範囲な減衰特性の評価法として用いることには疑問がある。

5. 粒子充てん構造物の減衰特性の評価法

5.1 減衰時間および減衰波形面積による減衰特性の評価

以上のように、一般的に用いられている周波数領域法や時間領域法により広範囲な減衰特性すべてを的確に評価することは困難である。そこで、振動の減衰時間や減衰波形面積により減衰特性を評価することができるかについて検討する。

図7は、減衰時間 T_r および減衰波形の面積 S_r の定義を示すための説明図である。減衰時間 T_r は、振幅 a が中空モデル構造物の初期振幅の r 倍 ($r < 1$) になるまでの時間である。例えば、 $T_{0.02}$ とは粒子充てん構造物の振幅 a が中空モデル構造物の初期振幅の 0.02 倍になるまでの経過時間を示す。減衰時間が同じであっても、減衰時間 T_r 内の振幅には差異のある場合もあり、 T_r のみにより減衰特性を完全に評価することはできない。そこで、減衰時間も考慮することができる振幅の経時変化に関連する減衰波形の面積 S_r により、広範囲な減衰特性を合理的に評価することが可能となるものと考えられる。減衰波形の面積 S_r は、図7に示すように自由振動応答において、時間軸と振幅の山の値 a_n と次の振幅の山の値 a_{n+1} により形成される台形の面積を減衰時間 T_r に至るまで順次加算したものである。この減衰波形の面積は、振幅が小さく、振動の減衰時間が短くなるほど小さくなるので、減衰特性を総合的に評価しうる量である。

減衰時間 T_r および振動波形の面積 S_r において、振幅比 r の設定が重要である。設定された r により減衰特性の評価結果は大きく異なることが考えられる。したがって、粒子充てん構造物の減衰特性を統一的に、そして簡便に求めることができる r の値について検討する。

低減衰能、高減衰能の場合について、時間とともに振幅比が小さくなっていく様子を図8(a)、(b)に示す。任意の r に対応する水平線と振幅比曲線の交点に相当する時間が減衰時間 T_r になる。振動波形が不規則な減衰を示す場合 [例えば図(a)のアルミナ球 $d=20$ mm のとき] には交点がいくつもあり、沢山の減

Fig.7 Damping time and damping wave area

衰時間が求められるがこれらのうちで最大のものが真の減衰時間となる。減衰時間 T_r のみで減衰能を評価しようとする図(a)、(b) いずれの場合にも減衰比 r の設定により相対的な減衰能評価が異なる。図8のデータのみから、振幅比 r の値を設定することは困難である。

粒子充てん構造物の減衰波形において、図2(b)に一例を示したように減衰傾向が途中で変化することが多い。すなわち、加振直後の減衰能が大きい部分と任意時間経過した後の減衰能が小さい部分に分けることができる。減衰能の大きい部分は粒子の衝突による減衰能が顕著な範囲であり、減衰能が小さい部分では粒子間および構造物壁面と粒子間の摩擦などによる影響が支配的である範囲と考えられる。減衰特性の評価では、より簡便に評価可能であることを1つの目的としている。そのため、すべての粒子充てん構造物の減衰波形において、上述のような減衰傾向が変化する振幅を含めた範囲で評価することができる振幅比 r を設定することが必要となる。そこで、図9は、減衰の傾向が変化するまでの経過時間 T_r (図2(b)) とその時点における振幅比 r の関係を粒径を変えて求めたものである。図より、減衰傾向の変化は振幅比 r が 0.1 より大きい範囲で生じていることがわかる。したがって、 $r=0.1$ として減衰特性を評価すれば、このような減衰傾向の変化も考慮した評価になる。

次に振幅比 $r=0.1$ の場合における減衰時間および減衰波形の面積を同時に評価することを試みた。縦軸に減衰波形の面積 S_r を、横軸に減衰時間 T_r をとり、減衰能を評価したものを図10に示す。例えば鋼球充てんの場合では、○印はハーフパワー法、対数減衰法のいずれでも評価ができた場合、●印は対数減衰法のみで評価が可能な場合、●印はハーフパワー法のみで評価が可能な

(a) Low damping capacity

(b) High damping capacity

Fig.8 Relation between amplitude ratio and time

場合、●印は両方法とも減衰能の評価ができなかった場合である。平均的には減衰時間が長いほど、減衰波形の面積も大きくなる傾向があるが、減衰能が大きい範囲 ($T_{0.1}$ あるいは $S_{0.1}$ が小さい範囲) においてプロット点のばらつきが多少大きくなっている。なお、他の振幅比についても図 10 の関係を検討してみたが、一般的な傾向は $r=0.1$ のときと同様である。これらの結果から両者の関係には多少のばらつきがあるが、減衰波形の面積の測定では減衰時間に加えてその振幅の大きさも考慮していることになる。粒子充填構造物の減衰特性には、粒子の衝突、摩擦、材料の内部減衰など多くの因子が影響を及ぼしている。これら複数の因子の影響を受けて発生する振動は、必然的に非線形振動となり、かつ高周波成分も含有している。これらの多くの要素の効果を包含して求められる減衰波形の面積は、減衰特性を的確に表わしているものと考えられ、粒子充填構造物の広範な減衰特性を評価する妥当な値である。ここで、この評価法を減衰波形積分法と呼ぶこととする。ハーフパワー法、対数減衰法は測定目的によっては優れた評価法であるが、広範な減衰特性を有する振動系ではハーフパワー法あるいは対数減衰法の適用範囲が限られるため多くの場合を统一的に評価できる減衰波形積分法のほうが優れている。本評価法は、粒子の衝突や摩擦などによる場合のほか急激な振幅変動や不規則な加振力を受ける場合など非線形性が顕著な振動系の減衰特性評価などに特に有用であると考えられる。

5.2 波形面積減衰率による減衰特性の評価

減衰波形の面積 S_d が小さいとき、振動系の減衰能が高いと評価することができる。ここでは、粒子充填の結果を明確にす

Fig. 9 Relation between critical damping time T_B and amplitude ratio r

Fig. 10 Relation between damping time $T_{0.1}$ and damping wave area $S_{0.1}$

るため、 S_d と中空モデル構造物に対する値 $(S_d)_0$ との比 $\sigma_d = (S_d)_p / S_d$ を波形面積減衰率と名付け、減衰能を評価した。 σ_d の値が大きいくほど、粒子充填により、減衰能が改善されていると評価することができる。

図 11 は、各種モデル構造物について求めた波形面積減衰率 $\sigma_{0.1}$ と充填粒径 d の関係を求めたものである。ガラス球およびアルミナ球充填の場合の $\sigma_{0.1}$ は、粒径が 12 mm または 6 mm までは粒径の増加に伴い大きくなり、それ以上の粒径では小さくなる。一方、鋼球充填の場合には、粒径が 7 mm までは粒径の増加に伴い $\sigma_{0.1}$ は大きくなるが、それ以上の粒径ではガラス球と同様に粒径の増加に対して急激に小さくなる傾向がみられる。しかし、粒径が 10 mm を超えると $\sigma_{0.1}$ は複雑に変化する。また、ガラス球充填の場合の粒径の違いに伴う減衰能変化は、鋼球やアルミナ球充填時に比べて非常に小さい。

図 12 は波形面積減衰率 $\sigma_{0.1}$ と図 3 で示した減衰比 ζ の関係を示したものである。図 3 で示したようにハーフパワー法による評価が適切ではないと思われる場合に対するプロット点内部に × 印を付けた。ガラス球充填の場合の ζ と $\sigma_{0.1}$ の間には、良い直線関係が認められる。したがって、この場合の減衰能は、 ζ 、 $\sigma_{0.1}$ のいずれによっても評価しうることが明らかになった。また上述のように波形面積減衰率 σ は、種々の減衰状態を的確に表示する係数である。鋼球、アルミナ球充填の場合には、 ζ と $\sigma_{0.1}$ の間に直線関係が認められないのは、ハーフパワー法による ζ の評価に問題があるためである。いずれにしても、波形面積減衰率は広範囲な特性を示す粒子充填構造物の減衰能を適

Fig. 11 Effect of ball size on wave area damping factor

Fig. 12 Relation between damping ratio ζ and wave area damping factor $\sigma_{0.1}$

Table 3 Application of damping characteristic evaluation

Damping capacity	Damped vibration	Half-power method	Logarithmic decrement method	Damping wave integration method
Low damping capacity	Periodic	○	○	○
	Random	△	×	○
Medium damping capacity	Periodic	○	○	○
	Random	×	×	○
High damping capacity	Periodic	×	△	○
	Random	×	×	○

切に評価しうる有効な指標である。

最後に、表 3 は、以上で述べたハーフパワー法、対数減衰法および減衰波形積分法による減衰特性評価の適用範囲について比較したものである。減衰特性に関して減衰能を低減衰能、中減衰能および高減衰能の 3 種類に分類し、さらにそれぞれの減衰能において振動波形の形態を卓越した固有振動数の数および振幅の減少の仕方を考慮して規則・不規則の 2 種類に分類した。ハーフパワー法および対数減衰法では、低、中減衰能で不規則な振動波形および高減衰能の振動波形に対しては正確な減衰特性評価ができなかったが、減衰波形積分法により広範囲な減衰特性の評価が適切にできるようになった。ただし、振幅比 r の決定には慎重な配慮が必要である。なお、ハーフパワー法において低減衰能で不規則な振動波形に対して△の記号を示したのは、比重の小さいガラス球やアルミナ球では加速度振幅はそれほど大きくならず、周波数応答結果において中空モデル構造物とほぼ同じ固有振動数の 1 つの卓越した振動数成分を示し、ハーフパワー法の適用が可能な場合もあるからである。さらに、対数減衰法において高減衰能で規則的な振動波形に対して同様に△の記号を示したのは、対数減衰率が、振幅変化量の大きい場合には振幅の絶対値が考慮されにくいことやわずかな振動が継続する場合にはそれらに強く影響されるために、適切な減衰特性の評価が困難であるからである。

6. ま と め

中空モデル構造物に粒子を充てんした粒子充てん構造物の振動減衰特性を的確かつ簡便に評価する方法について実験的に検討した。

充てん粒子の粒径や材質を変化させることにより得られる非常に広範囲な減衰特性を、自由振動応答における減衰時間および

減衰波形の面積を考慮した減衰波形積分法により適切かつ簡便に評価できることを示した。

評価係数は、波形面積減衰率である。振幅比は、減衰特性の評価が短時間の応答から可能となるように選択した。

また、広範囲な粒子充てん構造物の減衰波形に対して、ハーフパワー法、対数減衰法および減衰波形積分法による減衰特性評価の適用範囲を簡単な表にまとめた。

参 考 文 献

- 小林隆志, 柴田和彦, 松林恒雄, 後藤孝行: 鋼-レジンコンクリート複合構造の振動減衰能について (曲げ振動の場合), 日本機械学会論文集(C), 57, 536 (1991) 1387.
- 小林隆志, 松林恒雄, 柴田和彦: 繊維強化プラスチックの積層複合による鋼構造の振動減衰能改善について, 日本機械学会論文集(C), 58, 554 (1992) 3096.
- 井上喜雄, 岡田 徹, 上田宏樹: 制振材料を付加した三次元構造物の減衰特性解析 (二層形積層制振構造の場合), 日本機械学会論文集(C), 66, 644 (2000) 1089.
- 金森 満, 石原好之: 磁気ダンパの有限要素解析, 日本機械学会論文集(C), 54, 502 (1987) 1234.
- 小林博栄, 小林信之, 横井 領, 斎藤 修, 森下 信: ER 流体を用いた減衰力可変ダンパの基本特性, 日本機械学会論文集(C), 59, 566 (1993) 3008.
- 荒木嘉昭, 結城康式, 横道 勲, 陣内靖介: 粉粒体衝撃ダンパの特性 (第 3 報, インディシャル応答特性), 日本機械学会論文集(C), 50, 458 (1984) 1978.
- 橋本正俊, 若澤靖記, 丸井悦男: 粒子充てん構造物の振動減衰特性 (第 1 報, ガラス粒充てんによる減衰能改善), 精密工学会誌, 63, 9 (2000) 1446.
- 例えば, 日本機械学会: 振動・騒音計測技術, 朝倉書店, (1985), 107.
- 例えば, 日本機械学会: モード解析の基礎と応用, 丸善, (1986), 74.
- 王 信義, 佐藤壽芳, 大堀真敬: 衝撃応答による振動特性推定法と工作機械構造への応用, 日本機械学会論文集(C), 48, 432 (1982) 1175.
- 鈴木浩平, 河之邊浩: 時系列解析法を用いたモード特性の統計的同定法, 日本機械学会論文集(C), 54, 501 (1987) 1041.
- 小泉忠由, 新野秀憲, 伊東 誼: 接合面を有する系の減衰振動の解析, 日本機械学会論文集(C), 49, 448 (1983) 2110.
- 岡部眞幸, 清水信二, 福田理一: インパルス応答法による構造物の非線形性の推定法, 精密工学会誌, 59, 12 (1993) 2009.
- H.V. Panossian: Structural Damping Enhancement Via Non-Obstructive Particle Damping Technique, Trans.ASME, J.Vib.Acoust., 114 (1992) 101.
- 田辺郁男, 堤 正臣, Ch. Santoso: 振動高減衰化と高剛性化を特徴とするパウダーコンポジットダンパーの開発, 日本機械学会論文集(C), 64, 628 (1998) 4857.
- 安田仁彦, 豊田 満: 衝撃ダンパの制振作用について, 日本機械学会論文集(C), 43, 371 (1977) 2544.
- 斎藤 俊, 松田 勉, 遠藤 満: 柱体用衝撃ダンパの制振効果 (第 1 報, 自由振動応答および不規則励振応答による検討), 日本機械学会論文集(C), 60, 571 (1994) 824.
- 後藤彰彦, 松田全央, 濱田泰以, 前川善一郎, 松尾達樹, 北洞俊明: 種々の熱可塑性樹脂を用いた炭素繊維強化複合材料の力学的および振動減衰特性, 日本機械学会論文集(C), 59, 566 (1993) 2956.
- 山口秀谷, 額満親典, 塩谷駿介: ばね剛性制御による準能動形制振装置の研究, 日本機械学会論文集(C), 59, 560 (1993) 1040.